第 37 卷第 21 期 2017 年 11 月 | 生 态 学 报 ACTA ECOLOGICA SINICA | Vol.37,No.21 Nov.,2017

DOI:10.5846/stxb201608211712

廖敏,叶照金,黄宇,吕婷,沈杰,张云.长兴县合溪水库集雨区苗木地不同施肥管理模式对径流磷素流失的影响.生态学报,2017,37(21):7342-7350.

Liao M, Ye Z J, Huang Y, Lü T, Shen J, Zhang Y.Influence of different fertilization management modes on phosphorus loss in run-off from nursery land in the catchment area of Hexi reservoir in Changxing county.Acta Ecologica Sinica,2017,37(21):7342-7350.

长兴县合溪水库集雨区苗木地不同施肥管理模式对径流磷素流失的影响

廖 敏[1,2,*],叶照金[1,2],黄 宇[1,2],吕 婷[1,2],沈 杰[3],张 云[3]

1 浙江大学环境与资源学院,杭州 310058

2 浙江省亚热带土壤与植物营养重点研究实验室,杭州 310058

3 浙江省长兴县环境监测站,长兴 313100

摘要:为保护主要饮用水源合溪水库水质,长兴县将合溪水库集雨区农业种植结构向苗木种植方式调整,但缺乏优化施肥管理模式。针对该问题,选取集雨区典型苗木种植地进行径流小区定位试验,设置了撒施(对照)、地膜覆盖、秸秆覆盖、区外设置植草缓冲带、条施、穴施 6 个处理,研究不同施肥管理模式下苗木地径流磷素流失特征,筛选最优施肥管理模式,实现最大化的削减农田磷素流失。结果表明:不同施肥管理模式下,苗木地地表径流年总磷素径流流失通量大小顺序为:撒施(对照)>地膜覆盖>条施>穴施>区外植草缓冲带>秸秆覆盖,撒施(对照)、地膜覆盖、条施、穴施、区外设置植草缓冲带和秸秆覆盖六种施肥管理模式下的年总磷素径流流失通量分别为:9.60、9.14、5.49、4.44、2.48、1.37 kg hm^{-2} a^{-1},说明穴施、区外设置植草缓冲带和秸秆覆盖是较佳的施肥管理模式,若将其优化组合将显著消减合溪水库集雨区苗木地径流磷素流失及其对合溪水库水质的潜在影响。此外,不同施肥管理模式下,苗木地径流水样磷素流失的首要形态均为颗粒态磷,其次为溶解态磷,其中,撒施(对照)、地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施和穴施小区径流年均流失的颗粒态磷占流失总磷的比例分别是 66.09%、70.69%、67.97%、71.63%、68.11%和 67.87%。

关键词:合溪水库;苗木地;地表径流;磷素流失

Influence of different fertilization management modes on phosphorus loss in run-off from nursery land in the catchment area of Hexi reservoir in Changxing county

LIAO Min[1,2,*], YE Zhaojin[1,2], HUANG Yu[1,2], LÜ Ting[1,2], SHEN Jie[3], ZHANG Yun[3]

1 *College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou* 310058, *China*

2 *Zhejiang Provincial Key Laboratory of Subtropical Soil and Plant Nutrition, Hangzhou* 310058, *China*

3 *Changxing Station of Environmental Monitoring, Changxing* 313100, *China*

Abstract: In order to protect the main source of drinking water and ensure the quality of stream water from the Hexi reservoir, the government of Changxing county have adjusted the agricultural planting structure to nursery land in the catchment area of Hexi reservoir; however, the use of an optimized fertilization management mode is lacking. With this aim, site-specific observations were carried out in the catchment area of Hexi reservoir. Six fertilization management plots for typical nursery land were selected, including broadcast placement (contrast), plastic mulching, straw mulching, setting

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0200800)

收稿日期:2016-08-21; **修订日期:**2017-02-16

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liaomin@ zju.edu.cn

buffer for planting grass around nursery land, band placement, and hole placement, to explore the characteristics of different fertilization management modes on phosphorus loss in surface runoff, to screen the best fertilization management mode and to implement the the best method to reduce farmland phosphorous loss. The results showed that under different fertilization management modes, the concentration of annual phosphorus run-off erosion was in the order: broadcast placement (contrast) > plastic mulching > band placement > hole placement > setting buffer for planting grass around nursery land > straw mulching. The mean annual run-off loads of total phosphorus from broadcast placement (contrast), plastic mulching, band placement, hole placement, setting buffer for planting grass around nursery land, and straw mulching were 9.60, 9.14, 5.49, 4.44, 2.48, 1.37 kg hm^{-2} a^{-1}, respectively. This indicates that hole placement, setting buffer for planting grass, and straw mulching were the best fertilization management modes. Additionally, the optimal combination of fertilization management modes for nursery land of the catchment area of Hexi reservoir in Changxing county would significantly reduce the non-point source output phosphorus run-off of nursery land and reduce the potential impact on water quality from the Hexi reservoir. In addition, phosphorus particles were the main and first form of phosphorus loss in run-off and the next was dissolved phosphorus under all fertilization management modes. Furthermore, with the broadcast placement (contrast), plastic mulching, straw mulching, setting buffer for planting grass around nursery land, band placement, and hole placement, the annual run-off loss of phosphorus particles accounted for about 66.09%, 70.69%, 67.97%, 71.63%, 68.11% and 67.87%, respectively, of the total phosphorus.

Key Words: Hexi reservoir; seeding land; run-off; phosphorus losses

农田养分流失是面源污染输出的重要途径[1],也是水体富营养化的重要原因[2]。农田养分流失主要通过地表径流流入水体并污染水体水质[3]。我国耕地面积广、利用强度大,化肥消耗量也远超其他国家[4],农田 N、P 流失情况严峻。研究表明,农田养分 N、P 流失影响因素复杂,主要受降雨情况[5]、土地类型[6]、管理模式[7]等的影响。其中,有研究[8-10]表明土地利用类型决定了土壤的基本性质,是影响降雨径流量的重要因素,对氮磷径流输出及污染物质对地表水体氮、磷污染负荷具有重要的贡献。但不同土地利用类型 N、P 径流流失输出具有较大差异,章明奎等人[11]进一步研究表明不同耕地类型 P 输出量呈现休闲地<苗木地<稻田<轮作农田<蔬菜地,说明苗木种植是减少农田 P 面源输出的较佳土地利用方式。

合溪水库是浙江长兴县近 40 万人的主要饮用水源,其水质质量直接影响着当地居民的身体健康。磷是水土富营养化的主要限制因子[12],合溪水库上游集雨区存在约 2333 hm^2耕地,因此耕地的 P 面源输出是威胁合溪水库水质的重要污染源之一,为了削减耕地的 P 面源输出,基于已有研究成果证明苗木种植相对具有氮磷径流流失少、施肥频率低、经济效益高等特征,长兴县政府对合溪水库上游集雨区耕地种植结构进行调整,大力发展苗木产业,目前已有近三分之一约 800 hm^2调整为苗木种植地。目前,结构调整后的苗木地种植过程中,肥料的施用管理方式仍以撒施为主,如何优化合溪水库集雨区苗木种植地的肥料施用管理方式,是进一步优化减少集雨区耕地的 P 面源输出的关键,但相关研究缺乏。

鉴此,本研究采用田间径流小区定位研究方法,以合溪水库集雨区苗木种植为研究对象,设置撒施(对照)、地膜覆盖、秸秆覆盖、区外设置植草缓冲带、条施、穴施等 6 种施肥管理处理小区,探明不同施肥管理模式对合溪水库集雨区苗木地径流磷素流失的影响,以期为合溪水库集雨区苗木地种植提供优化的施肥管理方式,进一步实现集雨区耕地农业面源输出减量化和有效保护合溪水库水质提供科学依据和技术指导。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于浙江省湖州市长兴县合溪水库集雨区煤山镇(31°5′30″N,119°42′22″E),距离合溪水库集雨区雨水入库口 10 km。该区属亚热带海洋性季风气候,年均 1309 mm,年平均雨日为 144 d,历年平均气温

15.6℃,年均日照时数 1810.3 h。研究区地形主要为平原和低山,主要土壤类型为水稻土[13],中等肥力水平。该地区基本土壤理化性质情况为:pH 值为 6.56、有机质 17.23 mg/kg、硝态氮 21.83 mg/kg、铵态氮 256.62 mg/kg、全氮 6.25 g/kg、全磷 0.15 g/kg。

1.2 试验设计与处理

为了探究不同施肥管理模式对合溪水库集雨区苗木地径流磷素流失的影响,本研究采用径流小区定位实验,在合溪水库集雨区苗木地试验设置 6 个定位点,分别是:撒施,即习惯施肥(对照)、地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带(在撒施区外设置同等面积植草缓冲带)、条施、穴施等 6 种处理。每个小区尺寸均为 4 m×4 m。各小区 4 种及小区间起垄并用塑料薄膜隔开,以防小区间水的相互流动,膜埋深 80 cm。每小区留一排水口,在排水口安装一根长 1—3 m,内径 10 cm 的 PVC 管,出水口接一个容量约 1 m^3 的径流池,径流池上加盖。当地表径流发生时,计量地表径流量,并同时采集地表径流样品。监测期全年施肥量以当地苗木地常年施肥习惯量为主,采用复合肥(总养分≥48%,N-P_2O_5-K_2O=16-16-16),于每年 6 月、9 月各施一次,每次约 225 kg/hm^2,共施肥约 450 kg/hm^2。

径流小区定位实验持续 1 年,即:2015 年 4 月—2016 年 3 月。

1.3 径流水样采集及分析方法

自 2015 年 4 月到 2016 年 3 月 1 年监测期间,每次降雨产生径流后,待径流池产生径流水积累,测定并记录径流池中径流水样体积。采样前须人工搅拌径流池,充分混匀,采集混合样 500 mL 装于塑料瓶中并盖紧瓶盖,及时带回实验室进行水质分析。每次采集完水样后将径流池中余下水全部排出为积蓄下一次地表径流水样做准备,并在采集样品后记录降雨量大小。样品收集后冰冻保存,尽快测定,如水样样品不能及时测定,则保存于 4℃以上冰箱中,并于 24 h 内测定完成。测定时将样品分成 2 份,一份水样直接用于全磷(TP)的测定,一份水样经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后用于溶解态磷(DP)的测定。各指标测定方法见《水和废水监测分析方法》[14]。其中,TP、DP 过硫酸钾消解/钼锑分光光度法测定。水样中 TP 减去 DP 即得到水样中颗粒态磷(PP)的含量。

1.4 数据分析

在整个监测期中(2015 年 4 月—2016 年 3 月),磷素的流失量等于检测期内各次径流水中污染物浓度和产生的径流水体积乘积之和。

$$P = \sum_{i}^{n} C_i \times V_i$$

式中,P 为磷素径流流失量;C_i 为第 i 次磷素径流流失浓度;V_i 为第 i 次径流水体积。

数据处理采用 SPSS 11.5 软件对数据进行统计分析,差异显著性分析采用 LSD 法,显著性水平设定为 α=0.05,图表采用 Excel 2007 和 Origin 8.0 制作。

2 结果与讨论

2.1 不同施肥管理模式对合溪水库集雨区苗木地径流量的影响

表 1 是长兴县合溪水库集雨区不同施肥管理模式苗木地降雨量与径流量统计数据,由表 1 可知,2015 年 4 月—2016 年 3 月年降雨量约为 1606.7 mm,比常年降雨多 22.74%,降雨次数为 136 次,略低于常年 144 的年平均雨日。4—11 月是试验区全年降雨集中期,占全年降雨的 86.1%。7 月降雨量最大,为 259.9 mm,2 月份降雨量最小,仅为 28.5 mm,最大月降雨量为最小月降雨量的 9 倍。我国气象部门规定的降雨强度标准(按 24h 计)为:小雨<10 mm/24h,中雨 10.0—24.9 mm/24h,大雨 25.0—49.9 mm/24h,暴雨 50—99.9 mm/24h。按照这一标准,属于暴雨的有 5 次,属于大雨的有 9 次,属于中雨的有 36 次,中雨以上降雨占全部降雨次数的 36.76%,占全年降雨量的 76.62%。

降雨量的大小直接影响着苗木地不同施肥管理的小区地表径流,由表 1 可知,虽然不同施肥管理模式对相应试验小区径流量影响的不同,但通过对降雨量与各小区径流量进行数据统计分析后知所有试验小区径流

量均与降雨量呈显著正相关关系,相关关系分别为:撒施(对照)$R^2=0.6717$;地膜覆盖 $R^2=0.7879$;秸秆覆盖 $R^2=0.5497$;区外植草缓冲带 $R^2=0.5919$;条施 $R^2=0.6610$;穴施 $R^2=0.7183$。但不同施肥及地表管理模式下径流量差异较大。秸秆覆盖和区外植草缓冲带使径流量降低了 42.25%和 36.97%;条施和穴施使径流量增大了 9.20%和 4.94%;地膜覆盖使径流量增加了 342.05%,是撒施(对照)模式径流量的 4.42 倍。

综上分析可知,合溪水库集雨区不同施肥管理模式下苗木地降雨量和径流量相关性好,且径流量主要受降雨量控制,这与何艳[15]、熊亚兰[16]等人的研究一致。造成不同施肥管理模式试验小区径流量差异较大的原因是:秸秆覆盖、区外植草能减少降雨对土壤的直接冲刷、增加地表涵水能力;条施、穴施管理时对地表土壤的松动导致增加降雨与地表土壤的冲刷面积,导致径流量增大;地膜覆盖阻隔了雨水与土壤的直接接触,致大部分降雨随径流排出。

表 1　降雨量对不同施肥管理模式苗木地径流量影响/(m^3/hm^2)

Table 1　Effects of rainfall on runoff under different fertilization management mode in nursery land

年月 Time		降雨量 Rainfall/mm	径流量 Runoff					
			撒施 Broadcast placement	地膜覆盖 Plastic mulching	秸秆覆盖 Straw mulching	区外植草缓冲带 Setting buffer for planting grass around nursery land	条施 Band placement	穴施 Hole placement
2015	4 月	156.4	26.09	468.34	9.47	42.56	59.90	42.56
	5 月	159.8	94.06	500.32	73.25	50.76	123.56	106.18
	6 月	243.3	231.32	741.67	79.44	89.86	248.24	236.16
	7 月	259.9	341.10	1294.02	295.49	234.57	409.02	365.00
	8 月	118.4	61.71	318.10	15.61	44.44	69.22	64.85
	9 月	193	143.77	707.83	93.32	100.97	100.01	162.82
	10 月	93.7	7.37	181.04	2.15	1.27	9.77	9.46
	11 月	158.1	6.76	124.49	0.44	2.98	6.32	8.44
	12 月	51.1	2.39	198.68	0.95	1.44	2.57	2.29
2016	1 月	90.8	45.80	10.51	10.51	34.11	45.61	35.61
	2 月	28.5	12.40	0.30	0.30	3.00	3.00	3.00
	3 月	53.7	58.79	14.72	14.72	44.20	58.79	48.79
数据量 Data volume			12	12	12	12	12	12
自由度 Degree of freedom			10	10	10	10	10	10
残差平方和 Residual Sum of Squares			176.6	1557.04	157.72	86.3	242.14	173.43
皮尔逊相关系数 Pearson′s correlation coefficient			0.8196	0.8877	0.7414	0.7693	0.813	0.8475
相关系数 Coefficient of association(R^2)			0.6717	0.7879	0.5497	0.5919	0.661	0.7183

2.2　合溪水库集雨区不同施肥管理模式苗木地径流磷素流失特征

2.2.1　不同施肥管理模式苗木地径流总磷浓度动态特征

图 1 是合溪水库集雨区苗木地不同施肥及地表管理模式径流水样中 TP 浓度随时间变化的动态特征,由图 1 可知,在持续 1 a 的径流小区试验期间,不同施肥管理模式小区的径流水样中 TP 浓度呈现波动变化特征,其中,撒施(对照)、地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带等管理模式 TP 径流流失浓度都在 8 月份达到最大,分别为 1.19、0.47、0.37、0.67 mg/L;条施、穴施 TP 径流流失浓度均在 7 月份达到最大,为 1.11、0.70 mg/L。6 类施肥管理模式苗木地径流中,撒施(对照)处理径流 TP 浓度波动随时间变化最为剧烈且均最高,全年在 0.33—1.59 mg/L 间波动,平均值为(0.78±0.40) mg/L。而地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施和穴施 5 处理小区径流 TP 浓度波动随时间的变化表现相对平缓,但径流 TP 浓度均显著小于撒施处理,5 种处理 TP 浓度波动区间和平均值分别是:0.05—0.47 mg/L,(0.17±0.12) mg/L;0.11—0.37 mg/L,(0.19±0.09) mg/L;

0.13—0.67 mg/L,(0.32±0.20) mg/L;0.11—1.11 mg/L,(0.40±0.30) mg/L;0.11—0.83 mg/L,(0.34±0.25) mg/L。撒施(对照)小区径流全磷浓度波动随时间的变化表现为先降低至5月份逐渐升高,然后8月份达到相对峰值,之后逐渐降低,形成这一变化特征的原因可能是4月规划小区时频繁的人为活动使土壤表层松动增加全磷径流流失,小区设置完毕后土层达到相对稳定,所以4月后径流TP流失降低,之后随着雨季的到来及6月的应季施肥导致TP径流流失浓度增大,并于8月达到最大值,即土壤表面受降雨径流击溅和冲刷而产生水力侵蚀作用[17],造成土壤磷素淋失最大。其他5处理小区径流TP浓度波动随时间的变化相对平缓且浓度显著低于撒施处理小区的原因是:地膜覆盖和秸秆覆盖阻隔了雨水与土壤的直接冲刷作用;条施、穴施降低了雨水直接对所施肥料的直接淋洗作用;区外植草则形成了拦截缓冲带,使得直接径流带出的磷素得到一定的过滤和拦截。

整个径流小区试验期间,不同施肥及地表管理模式都对减少磷素径流流失浓度有比较积极的作用,地表覆膜、秸秆、区外植草缓冲带、条施、穴施相对于撒施(对照)其TP径流流失浓度分别减少了78.46%、75.21%、59.03%、48.09%、56.02%。地表覆膜、秸秆覆盖处理小区,下降最多,说明合理的施肥管理方式可进一步有效削减苗木地磷素的流失,也进一步表明降雨强度、施肥、降雨时间间隔与前期降雨量是决定径流磷素损失的关键因素[18-19]。

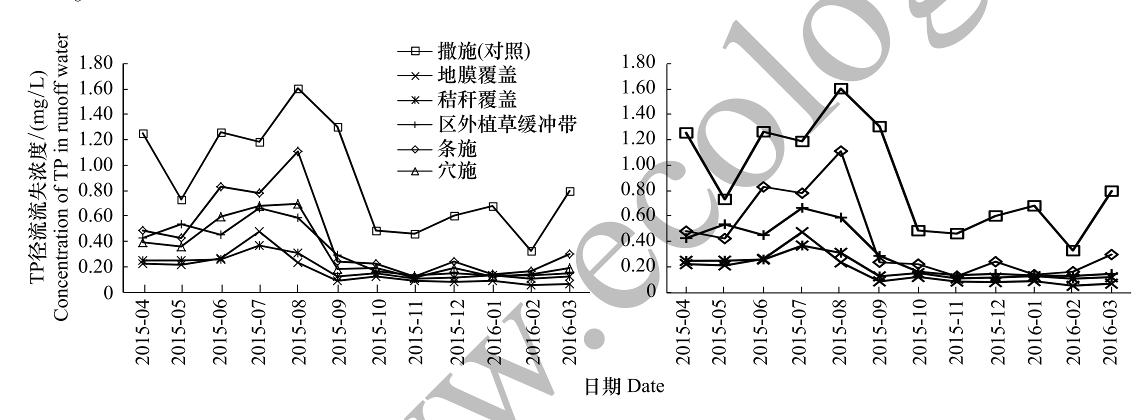


图1 不同施肥管理模式苗木地径流总磷浓度动态变化

Fig.1 Dynamic change of total phosphorus concentration in runoff water under different fertilizer management mode of nursery land

2.2.2 不同施肥管理模式苗木地径流溶解态磷浓度动态特征

由图2可知,监测期内不同施肥及地表管理模式小区的径流水样中DP浓度呈不同程度的波动特征变化。其中,撒施(对照)、秸秆、区外植草缓冲带3中模式DP径流流失浓度在7月份达到最大,分别为0.40、0.14、0.17 mg/L;地膜覆盖模式DP径流浓度在6月份达到最大,为0.12 mg/L;条施、穴施DP径流浓度在4月份达到最大。6类施肥管理模式苗木地径流水中,撒施(对照)小区径流DP浓度波动随时间的变化相对剧烈且径流DP浓度均较高且显著高于其他5类处理小区,径流DP浓度全年在0.13—0.47 mg/L间波动,平均值为(0.27±0.11) mg/L。而地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施和穴施5种模式径流DP浓度随时间变化相对平稳,DP浓度波动区间和平均值分别是:0.01—0.12 mg/L,(0.05±0.04) mg/L;0.03—0.15 mg/L,(0.06

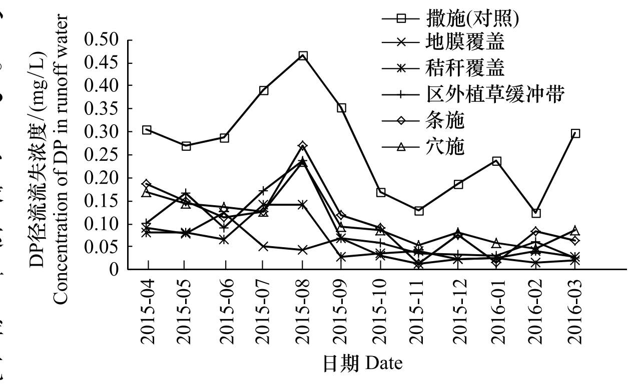


图2 不同施肥管理模式苗木地径流溶解态磷浓度动态变化

Fig.2 Dynamic change of dissolved phosphorus concentration in runoff water under different fertilizer management mode of nursery land

±0.04) mg/L;0.03—0.24 mg/L,(0.09±0.07) mg/L;0.01—0.27 mg/L,(0.11±0.07) mg/L;0.05—0.23 mg/L,(0.11±0.06) mg/L。撒施(对照)小区径流 DP 浓度波动随时间的变化表现为先升高,8 月份达到相对峰值,然后逐渐降低至降低水平,并于 1 月形成小峰后降低 3 月份回升。形成这一变化特征的原因是:6 月应季施肥和 7 月、8 月的强降雨导致 8 月 DP 径流浓度达到最大,但全年径流 DP 流失浓度变异程度较小。其他 5 类模式变化趋势基本是 6 月和 8 月形成相对峰值,之后降低并保持相对平稳状态,形成该变化特征的原因是:4—9 月的变化特征受前期频繁的人为活动、梅雨季节、应季施肥影响作用大,而 10—次年 3 月,降雨量相对较低,对 5 类管理模式径流溶解态磷淋失作用弱,使径流 DP 浓度相对平稳并保持较低水平。同时与撒施处理相比,地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施、穴施 5 类管理模式能显著降低径流 DP 浓度,分别减少 81.72%、77.02%、66.35%、59.24%、59.10%,地膜覆盖、秸秆覆盖 2 处理效果最好,说明合理的施肥管理方式可进一步有效削减苗木地溶解态磷素的流失。

2.2.3　不同施肥管理模式苗木地径流颗粒态磷浓度动态特征

由图 3 可知,地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施、穴施 6 种管理模式 PP 径流流失浓度均在 7 月份达到最大,分别为 0.42、0.23、0.49、0.65、0.55 mg/L,与 TP 径流流失基本一致;撒施(对照)管理模式 PP 径流流失浓度 8 月份达到最大,为 1.14 mg/L。6 类施肥管理模式苗木地径流水中,撒施(对照)小区径流 PP 浓度波动随时间的变化最为剧烈,全年在 0.20—1.14 mg/L 间波动,平均值为(0.62±0.32) mg/L,和 TP 变化情况一致。区外植草缓冲带、条施、穴施 3 处理小区径流 PP 浓度波动随时间变化表现较为剧烈,3 种处理 PP 浓度波动区间和平均值分别是:0.07—0.49 mg/L,(0.23±0.14) mg/L;0.05—0.65 mg/L,(0.29±0.23) mg/L;0.06—0.55 mg/L,(0.21±0.18) mg/L。而地膜覆盖、秸秆覆盖 2 小区径流 PP 浓度波动随时间的变化相对平稳且 PP 浓度都处于较低水平,2 种处理 PP 浓度波动区间和平均值分别是:0.02—0.42 mg/L,(0.11±0.11) mg/L;0.07—0.23 mg/L,(0.13±0.05) mg/L。撒施(对照)小区径流 PP 浓度波动随时间的变化表现为先降低至 5 月回升,然后 6 月份达到相对峰值,然后 7 月份降低,至 8 月份又达到另一相对峰值,之后逐渐降低,形成这一变化特征的原因是:6 月、9 月的应季施肥和 6 月—9 月的强降雨致径流 PP 流失浓度大,但全年径流 PP 流失浓度变化差异较小。条施、穴施、区外植草缓冲带 3 类管理模式 PP 径流浓度波动变化表现是先升高至 6 月和 7 月达到峰值,然后逐渐降低至降低水平。形成这一变化特征的原因是 6 月应季施肥及 6 月到 9 月的连续降雨导致径流 PP 流失浓度增大,而条施、穴施降低雨水对土壤的淋洗、区外植草缓冲带拦截径流磷流失、地膜覆盖阻隔雨水对土壤的直接冲刷等作用明显,所以 9 月后,4 类模式径流 PP 浓度逐渐降低并处于较低水平。地膜覆盖、秸秆覆盖 2 小区径流 PP 浓度随时间变化表现是整个监测期 PP 径流浓度基本趋于平稳并处于较低水平,形成这一变化特征的原因是:地膜覆盖和秸秆覆盖阻隔了雨水与土壤的直接冲刷作用,并作用明显。同时与撒施处理相比,地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施、穴施 5 类管理模式能显著降低径流 PP 浓度,分别减少 81.08%、79.07%、63.54%、53.24%、65.76%,说明合理的施肥管理是有效削减径流 PP 流失的重要措施。同时比较图 3 和图 2 可知,径流 PP 流失浓度显著高于 DP 流失浓度,这是因为,降雨是造成磷素流失最主要的自然原因,当径流流经土壤表层时,可以搬运细粒的土壤颗粒和轻质的有机物质,径流中流失的磷素污染通常吸附在被侵蚀的土粒中之故[20],造成颗粒态磷是耕地土壤磷径流流失的主要形态。王春梅[21]、袁兴程[22]等人的研究也表明径流中的磷主要以泥沙结合态的磷流失,即 PP 径流流失是磷素径流流失

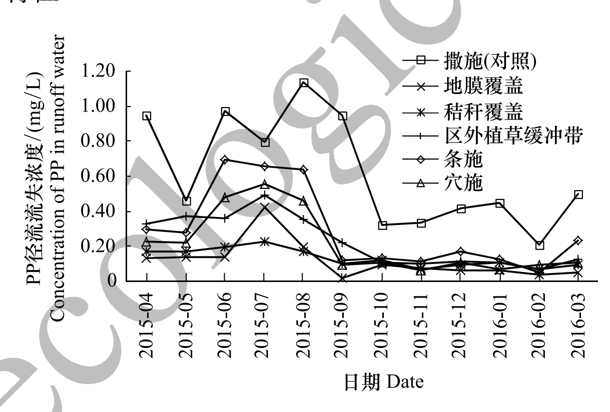


图 3　不同施肥管理模式苗木地径流颗粒态磷浓度动态变化

Fig.3　Dynamic change of particulate phosphorus concentration in runoff water under different fertilizer management mode of nursery land

的主要形式,本研究结果也证明了这一耕地土壤磷径流流失特征。

此外,由图 1—图 3 可知,不同施肥管理模式对径流不同形态磷输出浓度的影响存在显著的差异,这是因为耕地磷流失量主要决定于径流量、土壤侵蚀量以及径流和侵蚀土壤中的磷含量[23]。本研究表明苗木地不同施肥管理模式下产生的径流量和土壤侵蚀量有显著的差异,进而导致径流磷素的浓度变化差异明显。如秸秆和区外覆草缓冲带地表覆盖物丰富,有利于降雨的下渗并降低地表径流流速[24],减轻径流量和降雨对土壤的剥离作用,因而表现出径流中磷的流失浓度较低,可见这进一步说明合理的施肥管理方式是有效削减苗木地径流磷素流失的重要措施之一。

2.3 不同施肥管理模式单位面积苗木地径流年均不同形态磷流失通量及其组成特征

2.3.1 不同施肥管理模式单位面积苗木地径流年均不同形态磷流失通量

受地表径流磷流失浓度和径流量的影响,不同施肥管理模式苗木地各形态磷年径流流失通量结果见表 2,由表 2 可知,撒施(对照)、地膜覆盖、秸秆覆盖、条施、穴施和区外设置植草缓冲带六种施肥管理模式下的年 TP 径流流失通量分别为:9.60、9.14、1.37、5.49、4.44、2.48 kg hm^{-2} a^{-1},分别占总磷投入量的 15.00%、12.71%、1.91%、7.62%、6.16%、3.44%。各形态磷素中,TP、DP 年均径流流失通量由大到小均符合:撒施(对照)>地膜覆盖>条施>穴施>区外植草缓冲带>秸秆覆盖,PP 年均径流流失通量由大到小符合:地膜覆盖>撒施(对照)>条施>穴施>区外植草缓冲带>秸秆覆盖。不同施肥管理模式下苗木地各形态磷年均径流流失通量之间存在显著差异,与撒施(对照)相比,地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施和穴施年均径流 TP 流失通量分别是撒施(对照)的 95.24%、14.31%、25.83%、57.17%、46.27%和 20.33%,年均径流 DP 流失通量分别是撒施(对照)的 46.69%、7.67%、12.25%、30.49%、24.86%和 9.50%,年均径流 PP 流失通量分别是撒施(对照)的 167.43%、24.20%、46.01%、96.83%、78.10%和 36.44%。上述结果可看出,秸秆覆盖、区外植草缓冲带和穴施对径流磷素流失通量减少得最多,说明合理的施肥管理方式能显著减少径流磷素流失。其中,地表覆膜虽然其径流流失浓度小,但是其径流量大,其径流量是撒施(对照)、秸秆、覆草、条施、穴施的 4.4 倍、7.7 倍、7.0 倍、4.0 倍、4.2 倍,从而导致 TP 流失通量相应较大,甚至出现 PP 流失通量超过撒施(对照)的现象,表明地膜虽然能减少磷径流流失浓度,但巨大的径流量依然能带来不小的年磷素流失总量。

进一步分析可知,撒施(对照)与秸秆、区外植草缓冲带、条施、穴施存在显著差异(P<0.05),分别是秸秆、区外植草缓冲带、条施、穴施年均总磷径流流失通量的 7.0 倍、3.9 倍、1.7 倍、2.2 倍,穴施效果好于条施,而秸秆处理效果也显著优于穴施、条施。表明 6 类施肥管理模式中,撒施(对照)导致苗木地氮素径流流失量最大,浓度变化范围也最广。而秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施、穴施等施肥管理模式能显著减少磷径流流失,使小区年均总磷流失通量分别减少了 85.69%、74.17%、42.83%、53.73%;地膜覆盖和撒施管理模式全磷年径流流失通量差异不显著(P<0.05),地膜覆盖使 TP 年均径流流失通量减少了 4.76%,缓解磷流失作用不明显,这与其产生的大量地表径流有关。说明合理的施肥管理方式可进一步有效削减苗木地磷素的流失,意味着合溪水库集雨区种植结构转向苗木种植后,可选用相应优化施肥管理模式,即穴施搭配秸秆覆盖并增加外围植草缓冲带是进一步消减苗木地径流磷素流失的优化组合,将最大化的削减合溪水库集雨区苗木地磷素的面源输出,最大化的减轻合溪水库集雨区农业面源对合溪水库水体水质的潜在威胁。

表 2 不同施肥管理模式苗木地年均径流磷流失情况/(kg hm^{-2} a^{-1})

Table 2 The situation of annual average runoff phosphorus loss under different fertilizer management mode in nursery land

处理 Treatment	TP	DP	PP
撒施(对照)Broadcast placement (contrast)	9.60a	3.26a	6.35b
地膜覆盖 Plastic mulching	9.14a	2.68b	6.46a
秸秆覆盖 Straw mulching	1.37c	0.44c	0.93c
区外植草缓冲带 Setting buffer for planting grass around nursery land	2.48bc	0.70c	1.78bc
条施 Band placement	5.49b	1.75b	3.74b
穴施 Hole placement	4.44b	1.43b	3.02b

小写字母表示同列数据的差异显著性($P<0.05$);TP:全磷,Total phosphorus;DP:溶解态磷,Disolved phosphorus;PP:颗粒态磷,Particle phosphorus

2.3.2　不同施肥管理模式苗木地年均径流流失磷素形态组成特征

表 3 是 6 个处理小区不同形态磷素年均流失通量占年均总磷径流流失通量比例特征。由表 3 可知,撒施(对照)、地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施和穴施年均溶解态磷径流流失比例分别是:33.91%、29.31%、32.03%、28.37%、31.89%和 32.13%,年均颗粒态磷径流流失比例分别是:66.09%、70.69%、67.97%、71.63%、68.11%和 67.87%。说明颗粒态磷是径流水样磷素流失的主要形式,意味着采用合理的拦截颗粒态磷流失手段可以削减磷素进入水体的量,如区外植草缓冲带处理、秸秆覆盖等。

表 3　不同施肥管理模式苗木地年均磷素径流流失组成特征/%

Table 3　The composition characteristics of phosphorus in average annual runoff under different fertilizer management mode in nursery land

处理 Treatment	DP/TP	PP/TP
撒施(对照)Broadcast placement (contrast)	33.91	66.09
地膜覆盖 Plastic mulching	29.31	70.69
秸秆覆盖 Straw mulching	32.03	67.97
区外植草缓冲带 Setting buffer for planting grass around nursery land	28.37	71.63
条施 Band placement	31.89	68.11
穴施 Hole placement	32.13	67.87

3　结论

(1)合溪水库集雨区,不同施肥管理处理小区苗木地降雨量与径流量均呈正相关且径流量主要受降雨量控制,相关关系分别为:撒施(对照)$R^2=0.6717$;地膜覆盖 $R^2=0.7879$;秸秆覆盖 $R^2=0.5497$;区外植草缓冲带 $R^2=0.5919$;条施 $R^2=0.6610$;穴施 $R^2=0.7183$。但不同施肥管理模式小区的径流量存在显著差异,与撒施(对照)区相比,秸秆覆盖和区外植草缓冲带试验小区径流量减少了 42.25%和 36.97%;条施和穴施试验小区径流量增大了 9.20%和 4.94%,地膜覆盖试验小区径流量则增加了 342.05%。

(2)不同施肥管理模式下,合溪水库集雨区苗木地地表径流年总磷素径流流失通量大小顺序为:撒施(对照)>地膜覆盖>条施>穴施>区外植草缓冲带>秸秆覆盖,撒施(对照)、地膜覆盖、秸秆覆盖、条施、穴施和区外设置植草缓冲带六种施肥管理模式下的年总磷素径流流失通量分别为:9.60、9.14、1.37、5.49、4.44、2.48 kg hm^{-2} a^{-1},地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施和穴施等施肥管理模式小区年均总磷流失通量与撒施(对照)小区相比,分别减少了 4.76%、85.69%、74.17%、42.83%、53.73%,说明恰当的施肥管理模式能显著降低苗木地径流磷素的进一步流失。

(3)合溪水库集雨区,不同施肥管理处理小区苗木地,径流水样磷素流失的主要形态为颗粒态磷。其中,撒施(对照)、地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施和穴施小区径流年均流失的颗粒态磷占 TN 的比例分别是 66.09%、70.69%、67.97%、71.63%、68.11%和 67.87%。

参考文献(References):

[1]　陶春, 高明, 徐畅, 慈恩. 农业面源污染影响因子及控制技术的研究现状与展望. 土壤, 2010, 42(3): 336-343.
[2]　潘红波. 湖泊富营养化问题及其防治浅议. 环境科技, 2011, 24(S1): 123-126.
[3]　Zhou Z C, Shangguan Z P, Zhao D. Modeling vegetation coverage and soil erosion in the loess plateau area of China. Ecological Modelling, 2006, 198(1/2): 263-268.
[4]　李冠杰, 郑雅莉, 胡明, 穆丹丹, 范彬. 基于环境需求视角的农业面源污染防治对策. 农业经济与科学, 2014, 25(11): 6-9.
[5]　温海广, 周劲风, 李明, 肖绮虹. 流溪河水库流域非点源溶解态氮磷污染负荷估算. 环境科学研究, 2011, 24(4): 387-394.
[6]　曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 田耀武. 三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应. 环境科学, 2012, 33(10):

3390-3396.

[7] Giri S, Mukhtar S, Wittie R. Vegetative covers for sediment control and phosphorus sequestration from dairy waste application fields. Transactions of the ASABE, 2010, 53(3): 803-811.

[8] Arheimer B, Lidén R. Nitrogen and phosphorus concentrations from agricultural catchments-influence of spatial and temporal variables. Journal of Hydrology, 2000, 227(1/4): 140-159.

[9] Liang T, Wang H, Rung H T, Zhang C S. Agriculture land-use effects on nutrient losses in west Tiaoxi watershed, China. Journal of the American Water Resources Association, 2004, 40(6): 1499-1510.

[10] 向速林, 陶术平, 王逢武. 赣江下游不同样地降雨径流氮磷污染负荷估算. 生态科学, 2016, (2): 62-65.

[11] 章明奎, 王阳, 黄超. 水网平原地区不同种植类型农田氮磷流失特征. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3211-3220.

[12] 王霞, 吕宪国, 白淑英, 张竹青, 闫伯茹, 于力, 张学林, 张丽娴. 松花湖富营养化发生的阈值判定和概率分析. 生态学报, 2013, 26(12): 3989-3997.

[13] 杨丽萍. 浙江省两个典型流域水体污染特征及污染源解析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.

[14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[15] 何艳, 步春俊. 近 50 年湖漫水库径流量与降雨量特征分析. 浙江水利水电专科学校学报, 2013, 25(3): 23-27.

[16] 熊亚兰, 王昌全, 张科利, 宁茂岐. 北盘江流域降雨量和径流量年际变化研究. 水土保持研究, 2010, 17(5): 30-34.

[17] 宋泽芬, 王克勤, 孙孝龙, 和甲秋, 李红波, 依佼传. 澄江尖山河小流域不同土地利用类型地表径流氮、磷的流失特征. 环境科学研究, 2008, 21(4): 109-113.

[18] 刘宗岸, 杨京平, 杨正超, 邹俊良. 苕溪流域茶园不同种植模式下地表径流氮磷流失特征. 水土保持学报, 水土保持学报, 2012, 26(2): 29-32.

[19] 李瑞玲, 张永春, 刘庄, 曾远, 李维新, 张洪玲. 太湖缓坡丘陵地区雨强对农业非点源污染物随地表径流迁移的影响. 环境科学, 2010, 31(5): 1220-1226.

[20] Cox F R, Hendricks S E. Soil test phosphorus and clay content effects on runoff water quality. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(5): 1582-1586.

[21] 王春梅. 太湖流域典型菜地地表径流氮磷流失研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.

[22] 袁兴程, 钱新, 庞宗强, 李苗. 不同土地利用方式土壤表层氮、磷流失特征研究. 环境化学, 2011, 30(9): 1657-1662.

[23] 高超, 朱继业, 朱建国, 宝川靖和, 王登峰, 周娟娟, 高翔, 窦贻俭. 不同土地利用方式下的地表径流磷输出及其季节性分布特征. 环境科学学报, 2005, 25(11): 1543-1549.

[24] 刘宗岸. 坡地茶园集水区地表径流氮磷流失及其生态综合控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.